

# INFLUENCE DE LA VARIABILITÉ DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU MANTEAU NEIGEUX SUR LA STABILITÉ D'UNE PENTE DE NEIGE

Johan Gaume<sup>1</sup>, Jürg Schweizer<sup>1</sup>,  
Alec van Herwijnen<sup>1</sup>, Guillaume Chambon<sup>2</sup>,  
Nicolas Eckert<sup>2</sup>, Mohamed Naaim<sup>2</sup> ;

<sup>1</sup>WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos,  
Suisse ; <sup>2</sup>IRSTEA, Grenoble, France

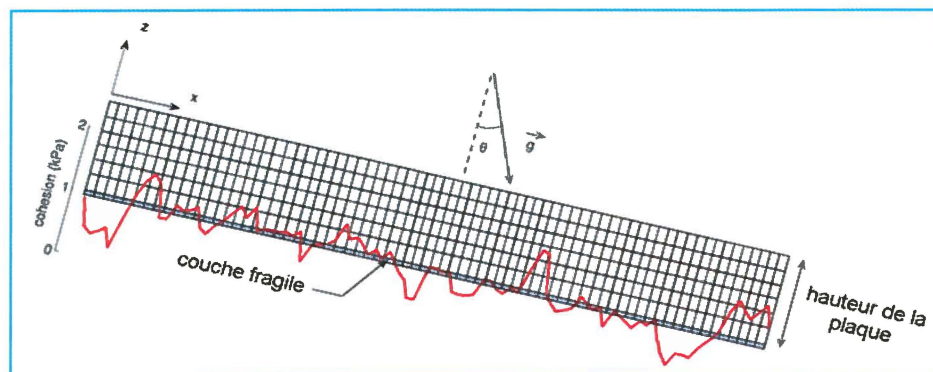


Figure 1 : Configuration du système plaque - couche fragile modélisé. La courbe rouge représente un exemple de réalisation de l'hétérogénéité de la cohésion de la couche fragile, pour une cohésion moyenne  $c = 1$  kPa et un coefficient de variation  $CV = 30\%$ . Le système est chargé en augmentant l'angle de la pente jusqu'à la rupture.

L'évaluation des conditions de déclenchement des avalanches constitue un défi important pour l'estimation du risque dans les zones montagneuses. La plupart des accidents d'avalanches sont causés par des avalanches de plaque, qui résultent généralement d'une suite de trois processus fondamentaux : (1) l'initiation de la rupture dans une couche fragile de neige sous une plaque cohésive, (2) la propagation de cette rupture au sein de la couche fragile et (3) la rupture en traction de la plaque sus-jacente qui engendre son détachement puis l'avalanche. La variabilité multi-échelles des paramètres en jeux ainsi que la microstructure complexe de la neige empêchent la prédiction précise des avalanches. La variabilité spatiale peut être due à l'interaction complexe entre le terrain et des facteurs externes comme les chutes de neige, le rayonnement solaire ou le transport par le vent mais peut être également due à des facteurs internes comme la métamorphose de la neige. Cette variabilité spatiale multi-échelles ainsi que la méconnaissance du comportement mécanique de la neige rendent complexe non seulement la compréhension de la genèse des avalanches mais également la modélisation déterministe du phénomène et donc sa prévision.

Dans cette étude, un modèle à la fois mécanique et statistique du système plaque cohésive-couche fragile et basé sur des simulations par éléments finis est utilisé pour examiner la stabilité du manteau neigeux et la probabilité d'occurrence d'une avalanche. Ce modèle prend en compte les variations de cohésion de la couche fragile ainsi que les effets de redistribution des contraintes par élasticité de la plaque. Ce système est représenté sur

la figure 1. De nombreuses simulations numériques ont été réalisées pour différentes caractéristiques du manteau neigeux et de la distribution spatiale de la cohésion de la couche fragile (moyenne, écart-type et longueur de corrélation, figure 1), ce qui a permis de calculer la probabilité d'avalanche  $P_{aval}$  en fonction des paramètres du système. Dans un premier temps, nous avons montré que cette variabilité possède un effet de réduction massive (« knock-down effect » en anglais) de la stabilité de la pente puisqu'elle a tendance à réduire considérablement la cohésion apparente de la couche fragile. Cet effet est dû à la concentration des contraintes au bord des zones les plus faibles, qui peuvent ainsi atteindre plus facilement la rupture. Par ailleurs, nous avons également mis en évidence un effet de lissage de la variabilité, dû à l'élasticité de la plaque sus-jacente. Ainsi, il sera plus facile d'initier une rupture au sein de la couche fragile dans le cas d'une plaque peu dense (plaque friable par exemple). Cependant, une fois la rupture initiée, une plaque dense et cohésive favorisera la propagation de cette rupture et donc la formation d'avalanches de grande ampleur.

Afin d'illustrer l'effet de la variabilité spatiale sur la stabilité d'une pente, nous avons calculé pour une pente virtuelle représentée sur la figure 2, l'indice classique de stabilité pour un déclenchement naturel SI (« Stability Index ») mais également la probabilité de déclenchement naturel calculée à partir de notre modèle mécanique-statistique pour une configuration du manteau neigeux donnée (hauteur de la plaque  $h = 0,5$  m, cohésion  $c = 800$  Pa, et densité de la plaque

$\rho = 250$  kg/m<sup>3</sup>) et pour deux valeurs du coefficient de variation CV (rapport entre l'écart-type de la cohésion  $\sigma_c$  et sa valeur moyenne  $\langle c \rangle$ ). On remarque tout d'abord que le critère de stabilité classique SI prédit une pente stable (sans surcharge due à un skieur) puisque  $SI > 1$ . Une partie de la pente est néanmoins « relativement stable » (fair) puisque  $SI < 1,5$  (critère issu de la littérature). Cependant, en utilisant notre modèle, on remarque que pour un coefficient de variation suffisant  $CV = 0,3$ , il peut y avoir plus de 50 % de chances d'avoir un déclenchement d'avalanche, ce qui devrait alors nous amener à qualifier la pente de « très instable ».

Ce résultat illustre bien ce « knock-down effect » de la variabilité spatiale des propriétés du manteau neigeux sur la stabilité d'une pente, qu'il sera très important de prendre en compte dans le futur au sein des procédures de prévision du risque d'avalanches.

Néanmoins, avant de pouvoir transférer ces nouveaux résultats dans la pratique, il sera nécessaire de connaître le lien entre la variabilité spatiale des caractéristiques du manteau neigeux et les conditions météorologiques sous-jacentes. C'est un sujet de recherche sur lequel des efforts sont actuellement déployés par les chercheurs du SLF de Davos (Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches, Suisse) et du Centre d'Études de la Neige (Grenoble). Ces études pourraient à terme, améliorer considérablement la prévision publique du risque d'avalanches à l'échelle locale. ■

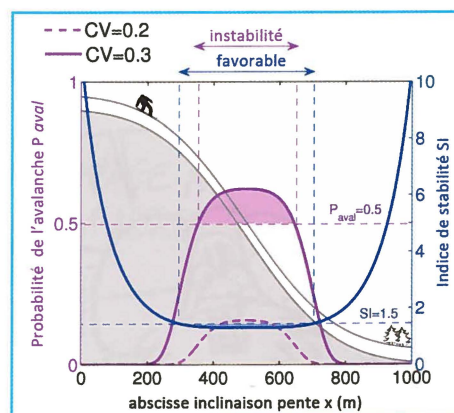


Figure 2 : Évaluation de la stabilité d'une pente pour un déclenchement naturel en utilisant (en bleu) l'indice de stabilité classique SI i.e. le rapport entre la résistance cohésion de la couche fragile et la contrainte de cisaillement et en utilisant (en magenta) un modèle qui prend en compte la variabilité de la résistance au cisaillement pour  $CV = 0.2$  et  $CV = 0.3$  et qui définit la probabilité de l'avalanche  $P_{aval}$ .